

Zbigniew KASPRZYK¹
Mariusz RYCHLICKI²

OCENA JAKOŚCI OBSŁUGI UŻYTKOWNIKÓWAUTOSTRADOWEGO SYSTEMU POBORU OPŁAT

W artykule przedstawiono propozycję oceny jakości obsługi użytkowników autostradowego systemu poboru opłat. Ocena ta jest częścią opracowania dotyczącego metody oceny niezawodności eksploatacyjnej autostradowego systemu poboru opłat w aspekcie wprowadzenia krajowego systemu poboru opłat oraz konieczności przystosowania już istniejących odcinków autostrad do standardów dróg płatnych. Wprowadzenie krajowego systemu poboru opłat na drogach krajowych ma zapewnić usprawnienie procesu poboru opłat wraz z zapewnieniem odpowiedniej jakości obsługi użytkowników w tym procesie. Krajowy system poboru opłat uwzględnia pozostawienie systemu mieszanego, eksploatację zarówno systemu elektronicznego jak i manualnego. W związku z powyższym szczególnego znaczenia nabiera tu zagadnienie optymalizacji jakości obsługi użytkowników manualnego systemu poboru opłat, które dotyczyć będzie dużej większości użytkowników pojazdów o dopuszczalnej masie całkowitej poniżej 3,5 tony. Wymagany poziom obsługi użytkowników jest odpowiednio zdefiniowany i bezpośrednio przekłada się na koszty eksploatacyjne wdrażanego krajowego systemu poboru opłat. W pracy zaprezentowano propozycję oceny powyższego parametru i przedstawiono podstawowe problemy wynikające z niewłaściwej jakości obsługi użytkowników systemu.

CUSTOMER SERVICE QUALITY ASSESSMENT OF MOTORWAY TOLL SYSTEM

The article describes a proposition of quality assessment service for motorway toll system users. The assessment is part of a study on methods for assessing the operational reliability of motorway toll system in terms of introducing a national toll system and the need of adapting sections of existing highways to toll roads standards. The introducing of national toll roads system is to ensure the improvement of the toll process with the ensuring of quality services to the users in this process. The national toll road system takes into account leaving a mixed system, both electronic and manual system. Therefore particular importance here is to optimize the quality of services to the manual toll collection system users, which will cover the vast majority of vehicles users with whole admissible loaded

¹ Zbigniew Kasprzyk, mgr inż., Politechnika Warszawska, Wydział Transportu, ul. Koszykowa 75, 00-662 Warszawa, Tel. 022 234-70-37, zka@it.pw.edu.pl

² Rychlicki Mariusz, dr inż., Politechnika Warszawska, Wydział Transportu, ul. Koszykowa 75, 00-662 Warszawa, tel. 022 234-73-11, mry@it.pw.edu.pl

weight below 3.5 tones. The required level of system users is appropriately defined and has direct impact on the operating costs of the national toll system which has been actually implementing. The paper presents the proposal of the assessment of above mentioned parameter and presents the basic problems arising from poor quality of system users.

1. WSTĘP

Zapewnienie bezpieczeństwa i ciągłości usługi transportowej na polskich drogach stanowi fundamentalną kwestię szczególnie w perspektywie wprowadzenia Krajowego Systemu Poboru Opłat. Zasadniczym celem wprowadzenia Systemu jest stworzenie sieci drogowej o znacznie wyższych niż obecnie parametrach użytkowych, zapewnienie wysokiej jakości obsługi użytkowników, w tym stworzenie zasadniczego szkieletu dróg o dużej przepustowości stanowiących sieć połączeń pomiędzy największymi ośrodkami gospodarczymi kraju. W rezultacie miałyby nastąpić redukcja zatłoczenia motoryzacyjnego w rejonach wielkich miast oraz znaczne skrócenie czasu przejazdu pomiędzy strategicznymi punktami dla rozwoju gospodarczego kraju. Osiągnięcie pożądaných efektów w tym względzie jest możliwe jednak poprzez odpowiednie utrzymanie infrastruktury drogowej polegające na wykonywaniu częstych remontów i przebudowy dróg w celu dostosowania ich do wyższych klas, oraz budowy nowych odcinków dróg ekspresowych i autostrad. Rekompensatą wysokich kosztów wytworzenia i remontów odpowiedniej jakości sieci dróg krajowych i zapewnienia wysokiej jakości obsługi użytkowników sieci drogowej jest nałożenie konieczności płatności na drogi krajowe w postaci budowy Krajowego Systemu Poboru Opłat.

2. PERSPEKTYWA WPROWADZENIA KRAJOWEGO SYSTEMU POBORU OPŁAT

2.1 Problem niejednorodności systemu poboru opłat

Budowa planowanej sieci dróg krajowych zgodnie z Programem Budowy Dróg na lata 2008 – 2012 [1] generująca wysokie koszty utrzymywania i rozbudowy sieci dróg skłania do wprowadzenia w najbliższym czasie Krajowego Systemu Poboru Opłat. Proces poboru opłat powinien przebiegać sprawnie, zapewniać ciągłości usługi transportowej oraz odpowiednią jakość obsługi użytkownika drogi płatnej. Użytkownicy dróg akceptują fakt pobierania opłaty za przejazd pod warunkiem gwarancji odpowiedniego komfortu jazdy drogami krajowymi a co za tym idzie również zapewnieniu jakości obsługi użytkowników uiszczających opłatę wraz z zapewnieniem ciągłości usługi transportowej. Komfort ten może zagwarantować wprowadzenie Elektronicznego Systemu Poboru Opłat w ramach KSPO ale w najbliższych latach system poboru opłat będzie systemem mieszanym. Ta niejednorodność systemu poboru opłat wymusza na zarządcy danego odcinka autostrady stosowanie manualnego systemu poboru opłat wraz z elektronicznym co dodatkowo podnosi koszty eksploatacji systemu i uniemożliwia zapewnienie jednakowej jakości obsługi płatności dla każdego rodzaju pojazdu.

3. OCENA JAKOŚCI OBSŁUGI UŻYTKOWNIKÓW AUTOSTRADOWEGO SYSTEMU POBORU OPŁAT

3.1 Wymagania w zakresie jakości obsługi użytkowników dla autostradowych systemów poboru opłat

Zapewnienie wymaganej jakości obsługi użytkowników autostradowego systemu poboru opłat definiowane jest na podstawie poniższych trzech kategorii [3]:

- poziom A: czas oczekiwania pomiędzy 0 a 90 sekund (kolejka 5 pojazdów lub mniej na pasach ręcznego poboru opłaty),
- poziom B: czas oczekiwania pomiędzy 90 a 180 sekund (kolejka od 6 do 10 pojazdów),
- poziom C: czas oczekiwania powyżej 180 sekund. (kolejka powyżej 10 pojazdów).

Dodatkowo dla konkretnego placu poboru opłat wymaga się by:

- poziom B nie będzie trwał przez okres dłuższy niż 45 minut jednorazowo lub też przez więcej niż 60 minut w okresie 24 godzinnym (od północy do północy),
- poziom C nie będzie trwał przez okres dłuższy niż 30 minut.

Powyższe wymagania muszą być spełnione aby zarządca autostrady zapewniał odpowiednią jakość obsługi użytkowników manualnego systemu poboru opłat na autostradzie.

3.2 Manualny system poboru opłat jako system masowej obsługi

Próba oceny jakości obsługi użytkowników autostradowego systemu poboru opłat zakłada stworzenie modelu procesu poboru opłat wraz z ruchem pojazdów na autostradzie. Proces modelowania ruchu pojazdów na autostradzie oraz ich obsługę w manualnym systemie poboru opłat w sposób intuicyjny można opisać za pomocą klasycznych zagadnień tzw. teorii masowej obsługi, czyli systemów kolejkowych. Kolejne stanowiska poboru opłat w manualnym systemie poboru opłat można przedstawić jako system stanowisk obsługi, do których zgłaszają się klienci. Stanowiska obsługi w systemie kolejkowym utożsamiane są ze stanowiskami poboru opłat, a klienci z nadjeżdżającymi pojazdami na plac poboru opłat. Kolejka zadań do wykonania, która powstaje na wejściu do stanowiska obsługi, to określona liczba pojazdów, oczekujących na uiszczenie opłaty na manualnym stanowisku poboru opłat. Jak widać opis systemu poboru opłat z wykorzystaniem teorii masowej obsługi stanowi idealne narzędzie wspomagania procesu projektowania takiego systemu. Wadą podejścia analitycznego do problemu jest znaczący wzrost złożoności opisu matematycznego przy wzroście liczby elementów składowych modelowanego systemu. W przypadku manualnego systemu poboru opłat problem ten nie występuje, ponieważ zagadnienie to jest bardzo bliskie elementarnym modelom klasycznym teorii masowej obsługi. Zgłoszenia pojazdów do manualnego systemu poboru opłat posiadają stochastyczny charakter umożliwiający w prosty sposób na opis tego systemu z wykorzystaniem modeli klasycznych.

Do opisu funkcjonowania systemu poboru opłat przyjęto, że zgłoszenia pojazdów odbywają się w sposób losowy a odstępy czasowe w których napływają pojazdy są

$$\begin{aligned}
 \frac{dp_{m-1}(t)}{dt} &= \lambda p_{m-2}(t) - [\lambda + (m-1)\mu]p_{m-1}(t) + m\mu p_m(t) \\
 \frac{dp_m(t)}{dt} &= \lambda p_{m-1}(t) - (\lambda + m\mu)p_m(t) + m\mu p_{m+1}(t) \\
 &\dots\dots\dots (2) \\
 \frac{dp_j(t)}{dt} &= \lambda p_{j-1}(t) - (\lambda + m\mu)p_j(t) + m\mu p_{j+1}(t) \\
 &\qquad\qquad\qquad j \geq m \\
 &\dots\dots\dots
 \end{aligned}$$

Przy warunkach początkowych:

$$\begin{aligned}
 p_0(0) &= 1, \\
 p_1(0) &= p_2(0) = \dots = p_i(0) = \dots = p_m(0) = \dots = p_j(0) = \dots = 0
 \end{aligned} \tag{3}$$

Dla stanów ustalonych przechodzimy do granicy $\lim_{t \rightarrow \infty} p_i(t) = p_i$, $\lim_{t \rightarrow \infty} p_m(t) = p_m$, $\lim_{t \rightarrow \infty} p_j(t) = p_j$. Zatem równania (2) można zapisać w postaci układu równań algebraicznych:

$$\begin{aligned}
 0 &= -\lambda p_0 + \mu p_1 \\
 0 &= \lambda p_0 - (\lambda + \mu)p_1 + 2\mu p_2 \\
 &\dots\dots\dots \\
 0 &= \lambda p_{i-1} - (\lambda + i\mu)p_i + (i+1)\mu p_{i+1} \\
 &\qquad\qquad\qquad 1 \leq i \leq m-1 \\
 &\dots\dots\dots (4) \\
 0 &= \lambda p_{m-2} - [\lambda + (m-1)\mu]p_{m-1} + m\mu p_m \\
 0 &= \lambda p_{m-1} - (\lambda + m\mu)p_m + m\mu p_{m+1} \\
 &\dots\dots\dots \\
 0 &= \lambda p_{j-1} - (\lambda + m\mu)p_j + m\mu p_{j+1} \\
 &\qquad\qquad\qquad j \geq m \\
 &\dots\dots\dots
 \end{aligned}$$

Prawdopodobieństwa stacjonarne przebywania systemu w poszczególnych stanach można opisać następującymi zależnościami [2],[4]:

$$\begin{aligned}
 p_i &= \frac{1}{i!} \rho^i p_0, & 1 \leq i \leq m-1 \\
 p_j &= \frac{1}{m! m^{j-m}} \rho^j p_0, & j \geq m \\
 \rho &= \frac{\lambda}{\mu}
 \end{aligned} \tag{5}$$

Uwzględniając warunek normalizacyjny mówiący o tym, że suma prawdopodobieństw jest równa jedności, otrzymujemy prawdopodobieństwo określające stan zerowy:

$$p_0 = \frac{1}{\sum_{i=0}^{m-1} \frac{\rho^i}{i!} + \frac{\rho^m}{m!} \sum_{j=m}^{\infty} \left(\frac{\rho}{m}\right)^{j-m}} \tag{6}$$

Przy założeniu, że $\frac{\rho}{m} \geq 1$ oraz liczba pojazdów w kolejce dąży do nieskończoności $j \rightarrow \infty$

to składnik sumy $\sum_{j=m}^{\infty} \left(\frac{\rho}{m}\right)^{j-m}$ jest rozbieżny. Przy założeniu, że składnik sumy ma

skończoną granicę oraz $\frac{\rho}{m} < 1$ otrzymujemy wyrażenie na prawdopodobieństwo zerowe uwzględniając warunek ergodyczności układu, czyli prawdopodobieństwo że w punkcie poboru opłat nie będzie żadnego pojazdu:

$$p_0 = \frac{1}{\sum_{i=0}^{m-1} \frac{\rho^i}{i!} + \frac{\rho^m}{(m-1)!(m-\rho)}} \tag{7}$$

Przechodząc do stanu ustalonego gdzie $t \rightarrow \infty$ istnieje możliwość wyznaczenia charakterystyk umożliwiających ocenę jakości obsługi użytkowników autostradowego systemu poboru opłat.

Jakość obsługi użytkowników autostradowego systemu poboru opłat możemy ocenić biorąc pod uwagę wymagania opisane w rozdziale 3.1.

W związku z powyższym istnieje potrzeba określenia dwóch charakterystyk związanych z oceną jakości obsługi autostradowego systemu poboru opłat:

- średni czas oczekiwania pojazdu w kolejce na realizację opłaty,
- średnia długość kolejki pojazdów oczekujących na realizację opłaty.

Założmy, że do placu poboru opłat z manualnym systemem poboru opłaty zgłasza się pojazd przy założeniu, że wszystkie stanowiska poboru opłat m są zajęte i nie ma kolejki, w tym wypadku użytkownik musi oczekiwać $\frac{1}{m\mu}$.

W przypadku gdy nowy pojazd zgłasza się do placu poboru opłat przy założeniu że zastaje już jedno zgłoszenie, wtedy średni czas oczekiwania pojazdu wynosi $\frac{2}{m\mu}$.

Można więc zatem zapisać, gdzie r to długość kolejki:

$$\bar{t} = \frac{1}{m\mu} p_m + \frac{1}{m\mu} p_m + \dots + \frac{(r-1)}{m\mu} p_{m+r} + \dots \quad (8)$$

Ostatecznie po przekształceniach otrzymujemy średni czas oczekiwania pojazdu w kolejce na realizację opłaty w manualnym systemie poboru opłat na placu poboru opłat [2]:

$$\bar{t} = \frac{\rho^{m+1}}{\mu(m-1)!(m-\rho)^2} P_0 = \frac{\left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^{m+1}}{\mu(m-1)! \left(m - \frac{\lambda}{\mu}\right)^2} P_0 \quad (9)$$

Drugą charakterystyką przydatną w ocenie jakości obsługi użytkowników autostradowego systemu poboru opłat w postaci manualnego systemu poboru opłaty jest średnia długość kolejki pojazdów oczekujących na realizację opłaty na placu poboru opłat. Do wyznaczenia tej charakterystyki potrzebna jest znajomość prawdopodobieństwa, że długość kolejki wynosi r (tzn. $j = m + r$) i jest określone wzorem [2]:

$$p_{m+r} = \frac{\rho^{m+1}}{m!m^r} P_0 = \frac{\frac{\rho^{m+r}}{m!m^r}}{\sum_{i=0}^{m-1} \frac{\rho^i}{i!} + \frac{\rho^m}{(m-1)!(m-\rho)}}, \quad r \geq 0, \quad \rho = \frac{\lambda}{m} < m \quad (10)$$

Prawdopodobieństwo że wszystkie stanowiska poboru opłat w systemie na placu poboru opłat są zajęte ($r = 0$) jest określone wzorem [2]:

$$p_m = \frac{\rho^{m+1}}{m!} p_0 = \frac{\frac{\rho^m}{m!}}{\sum_{i=0}^{m-1} \frac{\rho^i}{i!} + \frac{\rho^m}{(m-1)!(m-\rho)}}, \quad r \geq 0, \quad \rho = \frac{\lambda}{m} < m \quad (11)$$

Zatem średnią liczbę pojazdów oczekujących w kolejce na pobór opłat na placu poboru opłat można wyznaczyć z zależności [2]:

$$\bar{v} = \sum_{r=0}^{\infty} r p_{m+r} \quad (12)$$

Po przekształceniach mamy:

$$\bar{v} = \frac{\frac{\rho^{m+1}}{(m-\rho)^2(m-1)!}}{\sum_{i=0}^{m-1} \frac{\rho^i}{i!} + \frac{\rho^m}{(m-1)!(m-\rho)}}, \quad \frac{\rho}{m} < 1 \quad (12)$$

Zgodnie z zależnością zwaną I formułą Little'a dla stanu ustalonego mamy [2], [5]:

$$\bar{v} = \lambda \bar{t} \quad (13)$$

Zgodnie z wymaganiami użytkowymi manualnego systemu poboru opłat [6] intensywność obsługi pojazdów przy maksymalnym obciążeniu powinna wynosić 600 pojazdów/godzinę na pasie wjazdowym przy pobieraniu żetonu, natomiast średni czas obsługi jednego pojazdu na placu poboru opłat przy wyjeździe przez inkasenta wynosi około 0,6 minuty, czyli intensywność obsługi pojazdów na poziomie $\mu = 100$ pojazdów/godzinę. Przykładowo przyjmując dane na podstawie GPR 2005 [7] dla wartości SDR na odcinku Krzesiny - Września równą 11795 (numer pomiarowy 90318, droga A2) możemy przyjąć intensywność zgłoszeń pojazdów na poziomie $\lambda = 246$ pojazdów/godzinę. Na tym odcinku znajduje się plac poboru opłat Nagradowice z ilością stanowisk poboru opłat w liczbie 4 w jednym kierunku.

Do oceny jakości obsługi użytkowników autostradowego systemu poboru opłat założono, że znany jest rozkład napływu i obsługi pojazdów oraz opisany zgodnie z powyższym następującymi parametrami:

- $\lambda = 246$ pojazdów/godzinę,
- $\mu = 100$ pojazdów/godzinę,
- liczba stanowisk poboru opłat w jednym kierunku wynosi $m = 4$.

Przy powyższych założeniach określono z zależności (7) prawdopodobieństwo zerowe:

$$p_0 = \frac{1}{\sum_{i=0}^{m-1} \frac{\rho^i}{i!} + \frac{\rho^m}{(m-1)!(m-\rho)}} = 0,053 \quad (14)$$

Średni czas oczekiwania pojazdu w kolejce do stanowiska poboru opłat z zależności (9):

$$\bar{t} = \frac{\rho^{m+1}}{\mu(m-1)!(m-\rho)^2} p_0 = 0,0033 \text{ [h]} = 11,88 \text{ [sek]} \quad (15)$$

Średnią liczbę pojazdów oczekujących w kolejce na pobór opłat z zależności (13):

$$\bar{v} = \lambda \bar{t} = 0,811 \text{ [poj.]} \quad (16)$$

Zgodnie z wymaganiami w zakresie jakości obsługi użytkowników dla autostradowych systemów poboru opłat, opisanych w rozdziale 3.1, prognozowana jakość obsługi użytkowników manualnego systemu poboru opłat dla przedmiotowego odcinka autostrady A2 jest na poziomie A, czyli zadowalającym. Należy jednak zauważyć pewną cechę charakterystyczną dla wartości SDR. Są to wartości średnie, które nie ukazują rozkładu ruchu w poszczególnych porach doby lub roku oraz nie pozwalają one na poznanie wahań i nierównomierności ruchu. Same zaś wahania, które dotyczą głównie właśnie zmian poziomu natężenia ruchu w określonych przedziałach czasu także pozostają niewidoczne.

W związku z powyższym można przeprowadzić ponowną analizę oceny jakości obsługi użytkowników autostradowego systemu poboru opłat na tym odcinku z uwzględnieniem parametru nierównomierności kierunkowej ruchu przyjętej na poziomie 65% [8].

Te same obliczenia z uwzględnieniem nierównomierności kierunkowej ruchu dla $\lambda = 319,45$ pojazdów/godzinę, wykazały następujące wyniki:

Średni czas oczekiwania pojazdu w kolejce do stanowiska poboru opłat z zależności (9):

$$\bar{t} = \frac{\rho^{m+1}}{\mu(m-1)!(m-\rho)^2} p_0 = 0,0037 \text{ [h]} = 13,66 \text{ [sek]} \quad (17)$$

Średnią liczbę pojazdów oczekujących w kolejce na pobór opłat z zależności (13):

$$\bar{v} = \lambda \bar{t} = 1,181 \text{ [poj.]} \quad (18)$$

4. WNIOSKI

Rozbudowa sieci dróg krajowych w Polsce w ramach Planu Budowy Dróg Krajowych na lata 2011 – 2015 zwiększa znaczenie kwestii związanych z efektywną organizacją procesu manualnego poboru opłat na autostradach. Organizacja ta przekłada się w sposób oczywisty na jakość obsługi użytkowników autostradowego systemu poboru opłat, którzy chcą przejechać przez punkt poboru opłat możliwie jak najszybciej. Z drugiej zaś strony zarządca autostrady jest zainteresowany minimalizacją kosztów budowy systemu poboru opłat co przekłada się na zmniejszenie ilości stanowisk poboru opłat w manualnym systemie poboru opłat. Przeprowadzona próba oceny jakości obsługi użytkowników manualnego systemu poboru opłat umożliwia określić poziomy obsługi użytkowników definiowane w umowach koncesyjnych. Niedotrzymanie przedmiotowych poziomów jakości obsługi użytkowników nakłada na zarządcę konieczność płacenia kar umownych. Jak widać zatem problem zapewnienia odpowiedniej jakości obsługi uczestnikom ruchu na autostradzie jest istotny i jak najbardziej aktualny, szczególnie w perspektywie rozbudowy sieci drogowej na najbliższe lata przy pozostawieniu manualnych systemów poboru opłat dla pojazdów o dmc poniżej 3,5 tony.

5. BIBLIOGRAFIA

- [1] Załącznik do uchwały nr 163/2007 Rady Ministrów z dnia 25 września 2007 r.: *Program Budowy Dróg na lata 2008 – 2012*, Warszawa 2007 r.
- [2] Filipowicz B., *Modele stochastyczne w badaniach operacyjnych - analiza i synteza systemów obsługi i sieci kolejowych*, WNT, Warszawa 1996 r.
- [3] *Podstawowe Wymagania Techniczne do Projektowania, Budowy, Eksploatacji i Zwrotu Autostrady A2 Stryków I – Konotopa*, GDDKiA, Warszawa 2008 r.
- [4] Tikhonienko O.: *Modele teorii obsługi masowej w systemach informacyjnych*. Akademicka Oficyna Wydawnicza Exit, Warszawa 2003 r.
- [5] Czachórski T.: *Modele kolejkowe systemów komputerowych*, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 1999 r.
- [6] *Projekt Krajowego Systemu Poboru Opłat – Manualny i Elektroniczny System Poboru Opłat*, Specyfikacja Istotnych Warunków Zamówienia, GDDKiA, Warszawa 2010 r.
- [7] Opoczyński K., *Generalny pomiar ruchu 2005 Synteza wyników*, Warszawa, Transprojekt 2006 r.
- [8] *Pomiary natężeń, struktury rodzajowej i kierunkowej ruchu w wybranych pomocniczych punktach badan ekranowych*, GDDKiA, Warszawa 2010 r.
- [9] *Instrukcja obliczania przepustowości dróg I i II klasy technicznej (autostrady i drogi ekspresowe)*, GDDP, Warszawa 1995 r.